

疲労試験データベースの開発

Development of fatigue test database

○倉本 賢治* 中村 聖三** 橋本 末嗣*** 高橋 和雄****

Kenji KURAMOTO, Shozo NAKAMURA, Suetsugu HASHIMOTO and Kazuo TAKAHASHI

ABSTRACT It is important to collect the fatigue test data of steel structures for the construction of an adequate fatigue design method. The fatigue database developed by Yamada around 1990 was used to determine the design S-N curves in the fatigue design recommendations. However, it cannot be used now because enough maintenance had not been done afterwards. In this study, a new fatigue test database was developed with Microsoft VisualBasic.NET 2003, referring to the function and the user interface of Yamada's database. All data in Yamada's database was imported and some new data was appended to it.

Keyword : 疲労, データベース, S-N 線図, 疲労試験, 鋼構造物
Fatigue, database, S-N curve, fatigue test, steel structure

1. はじめに

鋼構造物の疲労試験データを収集・整理することは、適切な疲労設計法の構築のために重要である。山田ら¹⁾が1990年前後に開発した約7,000に及ぶ疲労試験結果を収めた疲労データベースは、JSSC 疲労設計指針²⁾(以下JSSC指針)の設計S-N線図を構築するために活用された。しかし、その後必ずしも必要なメンテナンスが行われてこなかったため、現在は十分に活用できる状態にはない。疲労データベースは、山田らが開発したもの以外にも現在までに様々な機関で開発されている。例えば、物質・材料研究機構(旧金属材料研究所, 以下NIMS)で公表されている「疲労データベース³⁾」のような、材料名を基にWeb上でPDFファイルの疲労データシートを利用者に提供するものや、日本材料学会が公表している「Web版疲労の趨

勢抄録検索システム⁴⁾」のように、論文名や著者名を入力し、疲労部門委員会委員によって作成された抄録のみを検索するシステムなどがある。しかし、著者らの調査では、鋼材の種類や継手形式別の疲労強度を分析できるデータベースは見当たらなかった。そこで本研究では、疲労データから論文名を表示することができる機能や、収納されている疲労データを検索し、それを基に利用者がS-N線図の作成や耐久性の比較などの分析を行うことができる機能などを装備した、多面的な作業が可能なデータベースを開発することを試みた。本データベースは、山田らが開発したデータベースに収納されたデータを活用するとともに、その機能・ユーザインターフェイスを参考にして開発している。また、文献等より新たな疲労試験データを追加したので、その概要を報告する。

*学士(工) 長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

**博(工) 長崎大学 工学部社会開発工学科 准教授

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号) 第2種正会員

***学士(工)(株)不動テトラ 東京本店土木工事部工事課 (〒103-0016 中央区日本橋小網町7番2号)

****工博 長崎大学 工学部社会開発工学科 教授

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号) 第2種正会員

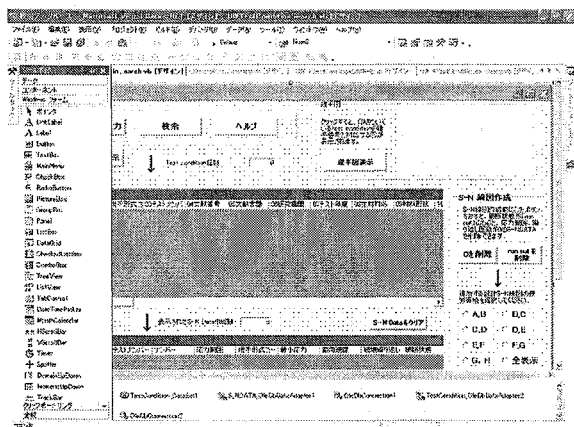


図-1 総合開発環境

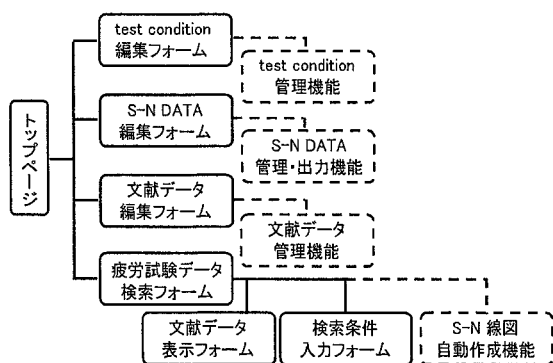


図-2 データベースの全体構成

2. 開発方法

データベース作成ソフトには Microsoft VisualBasic.NET 2003(以下 VB)を使用した。また、データを格納するために Microsoft Access 2000(以下 Access)、データの外部出力と S-N 線図作成の自動化のために Microsoft Excel 2000(以下 Excel)を用いた。VB では図-1 に示す総合開発環境と呼ばれる画面上で、フォームのデザインやプログラミングコードの記述などアプリケーション作成に必要な作業を総合的に行える。また、フォームのデザインに必要な設定や Access との連結作業の一部を総合開発環境の特定のメニューを用いて簡単に行えるため、コードの記述が不要となる。オートメーション機能を用いて、Excel 等の Microsoft アプリケーションを操作することもできる。また、開発したデータベースを単独アプリケーションとして利用することが可能である。

3. データベースの設計

3.1 基本的な考え方

疲労試験の結果は、対象構造物の疲労寿命を

推定するなど耐久性評価に利用できるが、既存鋼構造物の疲労損傷の防止や今後の鋼構造物の計画・設計を適切に行うための種々の分析にも利用される。本データベースの開発は、疲労に関する実験結果の管理、分析を容易にすることを目的としている。また、利用者が容易に利用できるよう、可能な限りわかりやすい画面表示となるように配慮した。

3.2 必要とされるデータの管理・分析機能

(1) データ管理機能

疲労試験結果や文献データをデータベース内で管理するにあたってまず必要なのが、各データをできるだけ簡単に入力する機能である。また、入力されたデータは保存するだけではなく、必要に応じて閲覧できなければならない。そのため、入力されたデータを見やすいように一覧表示できるようにする必要がある。次に、データ入力後そのデータに誤りが見つかったときなどには、そのデータを修正しなければならない。そのため、データの修正機能が必要である。また、今後必要なデータのみデータベースに残したいなど、利用者各自の使用目的があると考えられるため、データベースから疲労試験に関するデータを削除できるようにすることも必要である。疲労データである test condition と S-N DATA、文献データはそれぞれ独立したフォームにて構成している。利用者が利用しやすいように配慮し、新規入力、ヘルプ、修正・削除機能は各フォーム内に設置している。

(2) データ分析機能

本データベースは疲労試験データや文献データを管理するだけを目的とするものではない。収集した疲労試験データを、設計 S-N 線図の検討等に利用できるようにしなければならない。利用者が継手形式別の S-N 線図の作成や耐久性の比較などを行えるようにするためには、まず指定された継手形式や試験体の条件に合致したデータを表示できる検索機能が必要である。次に、条件を指定して検索した疲労試験結果を容易にグラフ化(S-N 線図化)することができる機能も付与すべきである。また、利用者が快適に分析できるようにするために、外部アプリケーション(例えば Excel)を本デ

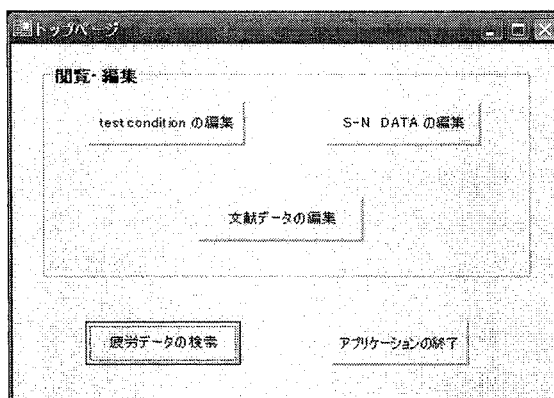


図-3 トップページ

[illegible]

図-4 test condition の編集

[illegible]

図-5 疲労データの検索フォーム

データベースにて起動できることが望まれる。本データベースの開発では、以上の分析機能を実現することを目指した。

3.3 データベースの構成

本データベースを開くと同時にトップページが表示され、各機能をトップページから利用できるようにした。ただし、疲労試験結果をグラフ化(S-N 線図化)する機能は、検索フォームを通じて利用するのでトップページには配置していない。本データベースの全体構成を図-2に示す。

4. データベースの利用法

4.1 トップページ

データベースの利用は、全て「トップページ」(図-3)から始まる。「トップページ」には閲覧・編集のための「test condition の編集」、「S-N DATA の編集」、「文献データの編集」、そ

して検索・分析のための「疲労データの検索」の各ボタンが配置されており、ボタンをクリックすると各フォームが表示される。

4.2 閲覧・編集機能の利用

編集フォームは、前述した 4 つの作業を行うためのそれぞれ独立したフォームで構成しており、これらのフォームを開くと、画面全体に各データの情報が一覧表示される。フォームの一例として、「test condition の編集」フォームを図-4 に示す。フォームには編集に必要な[新規登録]、[行の削除]、[保存]、[ヘルプ]の 4 つのボタンを配置しており、データの格納は Access テーブルを利用している。データベース内の編集は見かけ上 VB で開発したデータベースのフォーム上で行うことになるが、実際は VB と連結している Access テーブル上で情報が更新されている。「新規登録」は、新たなデータを入力する時に利用する。このボタンを

図-6 検索条件入力フォーム

図-7 文献データ表示フォーム

図-8 文献データがない状況

クリックすると、閲覧された表の最下行にカーソルが移動し、その行に新たなデータを入力することができる。ただし、打ち込みが終了しても Access テーブルが更新したことにはならず、データを更新するために「保存」ボタンをクリックする。もし「保存」ボタンを押さずにフォームを閉じようとする、警告文が出て利用者に知らせるようになっている。「行の削除」は

不要になった試験体の情報を削除する時に利用する。削除したいデータの行を選択した状態でこのボタンをクリックする。

4.3 検索機能の利用

「疲労データの検索」フォーム(図-5)を開くと、画面に二つのテーブル(test condition・S-N DATA)が表示される。画面の上部には検索に使用する「検索条件入力」ボタン、「検索」ボタンを配置している。「検索条件入力」は利用者が必要とする test condition の条件を入力する機能である。「検索条件入力」ボタンをクリックすると[検索条件入力]フォーム(図-6)が開く。このフォームには test condition の全項目名が配置されており、利用者は設定したい条件項目の値を入力する。入力したものを一度削除したい場合は「クリア」ボタンを押す。入力が終わり「OK」ボタンをクリックすると元のフォーム画面に戻る。次に[疲労データの検索]フォームで「検索」ボタンを押すと、入力した条件に該当する test condition のみが示される。また、フォーム上には表示されている test condition の総数を表示するカウンターが配置されており、データのヒット数を確認することができる。さらには、表示されている test condition の行を選択した状態で、「継手図表示」ボタンをクリックすると、選択した継手の図を表示することができる。このフォームに表示される二つの表はプログラムにより関連付けされており、test condition の表において行を選択すると、それに対応した S-N DATA が表示されるようにしてある。疲労試験条件を選択することで、その疲労試験結果が表示されるということである。こうすることで、利用者が瞬時にデータの関係を閲覧できるようになったと考えている。test condition を複数回選択すると S-N DATA は累積されるが、必要ならば表示をクリアすることができるようにしている。

本データベースを利用する際、ユーザーが格納されたデータより詳細な情報を必要とすることも考えられる。そこで、図-7に示す文献データ表示フォームを作成し、検索フォーム上の「文献データを表示」ボタンを押すと、文献番号・著者名・文献名・掲載誌名・文献発行年度・記載ページを含む対応表が表示されるように

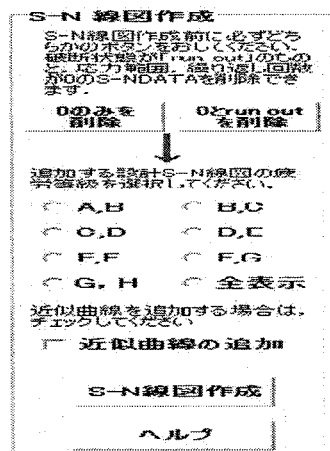


図-9 S-N 線図作成グループ

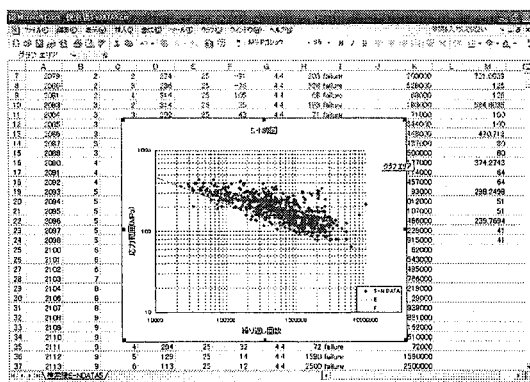


図-10 Excel 上に出力した S-N 線図

した。しかし、文献データは現時点では不足しており、検索しても文献データが表示されない場合がある。そこで、このフォームには検索した S-N DATA に対応する test condition も表示させるようにし、どの疲労データの文献データが不足しているのかを確認できるようにした。図-8 は、疲労データに対して文献データが対応していない状況を示しているものである。上のテーブルに test condition が表示されているが、下のテーブルには文献データが表示されていないことがわかる。

4.4 分析機能の利用

S-N 線図の作成を自動化するため、検索フォーム上に図-9 に示す S-N 線図作成グループを作成した。このグループの使用手順は以下のとおりである。まず、「0 のみを削除」、「0 と run out を削除」のどちらかのボタンを押して、グラフにプロットしないデータを S-N DATA テーブルから削除する。これは、繰り返し回数や応

表-1 既存・追加データ数の比較

継手番号	実験数		試験体数	
	既存	追加	既存	追加
11	110	26	686	211
21	101	88	708	544
23	5	35	37	148
25	114	23	754	150
26	13	16	96	87
31	42	15	275	69
48	1	22	3	149
49	0	2	0	10
55	28	5	194	30
61	2	8	12	42
62	10	1	59	5
63	3	1	19	10
81	11	30	26	51
データ総数	798	359	5148	2102
	1157		7250	

表-2 追加継手番号

継手番号	継手名称
93	縦ビード溶接(すみ肉溶接)
94	腐食材
95	重ねガセット
96	縦すみ肉溶接継手(首溶接)
97	垂直補剛材下端

力範囲に 0 が含まれると両対数グラフにはプロットできず、また近似曲線を引く際には破断状態が「run out」(未破断)のデータを省いておく必要があるためである。次に、S-N 線図に追加する設計 S-N 線図の疲労等級分類をラジオボタンから選択する。この設計 S-N 線図は、JSSC 指針²⁾のものである。さらに、近似曲線を追加するかどうかをチェックボックスで選択する。追加される近似曲線は両対数グラフ上で直線になる累乗近似曲線であり、 R^2 値(決定係数)も表示されるように設定している。最後に、S-N 線図作成ボタンを押すと、選択したデータを出力し、Excel を起動して S-N 線図を作成する作業が行われる。Excel 上に S-N 線図を出力したときの様子を図-10 に示す。

5. データの追加

本データベースをより充実させるために、疲労データの追加を行った。以前開発されたデータベースには、49 種類の継手形式に関して合

表-3 データ数の比較

継手形式	NIMS		本データベース	
	実験数	試験体数	実験数	試験体数
横突合せ継手	64	462	189	1252
荷重伝達型十字グループ溶接継手	2	20	40	185
荷重伝達型十字すみ肉溶接継手	6	63	42	307
非伝達型リブ十字すみ肉溶接継手	42	330	137	904
4 継手のデータ総数	114	875	408	2648

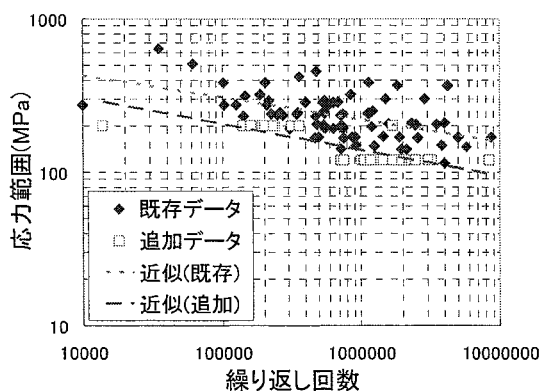


図-11 リブ T 字すみ肉溶接継手

計約 7,000 の疲労試験結果が収められていたようであるが、本データベースにインポートできたデータ数は 5148 であった。今回、文献等より新たに 2102 のデータを追加したため、現時点で本データベースに収納されている疲労試験データ数は 7250 となっている。

代表的な継手に関して、今回追加したデータ数を既存データ数と併せて表-1 に示す。「荷重伝達型十字グループ溶接継手」(23 番)、「リベット桁」(48 番)など、既存データ数の倍以上に増加した継手形式もある。また、以前は 92 番までの継手しかなかったが、今回新たに 93～97 番の継手番号を追加したので、全 54 種類の継手形式が収納されていることになる。継手番号と継手名称の対応を表-2 に示す。この継手番号は暫定的に設定したものであり、今後データの内容や対応させるべき設計規準（指針）等を勘案し、見直しを図る予定である。

本データベースに収納している疲労データ数を、1. で述べた NIMS の疲労データベースに収納されている疲労データのうち溶接構造物に使用される鋼材に関するデータ数と比較して表-3 に示す。同表より本データベースの方

が溶接継手に関する疲労データが多いことがわかる。ただし、NIMS の疲労データベースには溶接構造用のみではなく、多くの鋼種に関する疲労データが収納されている。

6. 収集データの分析

データの追加によって総データ数が倍近く、または倍以上に増えた継手について、S-N 線図にどのような変化が生じたか考察を行う。また、以降の S-N 線図は本データベースにより作図したものであるが、見やすくするため加工してある。

6.1 リブ T 字すみ肉溶接継手

図-11 は S-N DATA 数が 96 から 183 に増加した「リブ T 字すみ肉溶接継手」(26 番)の S-N データから、未破断のデータと海水中で実験が行われたデータを省いているので、このグラフ上では、特に追加データにおいて数が少なくなっている。

追加データは全て何らかの残留応力処理が行われているが、既存データに比べて近似曲線が 2 等級ほど低くなっている。既存データと追加データの違いは、前者が全て「曲げ試験」であるのに対して、後者は全て「軸方向試験」であることである。継手の疲労強度は、疲労亀裂発生点の局所的な応力だけでなく疲労亀裂が進展する断面の応力分布にも影響されるので、軸力が作用する場合と曲げ応力が作用する場合では、同じ大きさの応力範囲でも疲労強度が異なると言える。JSSC 指針²⁾には、曲げ応力を受けたときの疲労強度のほうの方が平均値で 50%、（平均-2×標準偏差）で 40%高いと記述されている。

図-11 に用いた既存データと追加データに関して、S-N 線図の傾きを JSSC 指針と同じ-1/3

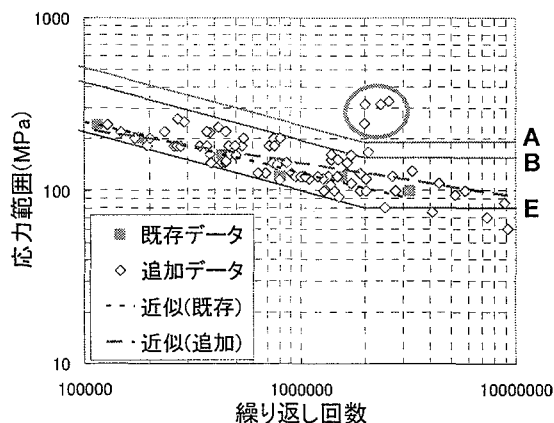


図-12 荷重伝達型十字グルーブ溶接継手

に固定して求めた回帰直線を平均値とし、200万回で両者を比較すると、既存データで172.6(MPa)、追加データで106.3(MPa)となり、既存データのほうが62.4%高くなった。また、対応する標準偏差が、既存データで67.7(MPa)、追加データで26.3(MPa)と既存データのほうが大きいため、(平均値-2×標準偏差)の値は、既存データで37.2(MPa)、追加データで53.7(MPa)となり、追加データの値のほうが44.4%大きくなった。

平均値に関しては、JSSC 指針で示している値と同程度であると考えられるが、(平均値-2×標準偏差)の値は、追加データ(軸力が作用する場合)がほぼ同様の試験条件で得られたものが多く標準偏差が小さくなったため、JSSC 指針とは逆の結果になったと考えられる。よって、今後も詳細データの追加を行っていくことが重要であるといえる。

6.2 荷重伝達型十字グルーブ溶接継手

図-12はS-N DATA 総数が37から185に増加した「荷重伝達型十字グルーブ溶接継手」(23番)のS-NデータにA, B, Eの設計S-N線図を追加し、未破断のデータや溶接欠陥を持つデータ、海水中で実験が行われたデータを省いたものである。

大半のデータがJSSC 指針²⁾の定めているこの継手(溶接部非仕上げの場合)の疲労強度であるE等級を満たしている。追加データは、既存データのばらつきの範囲内であるとも考えられるが、各データの近似曲線に注目すると、追加データの傾きが緩く、長寿命域で強度がやや高くなってい

る。これは追加データに溶接部の溶け込みが良好だったものと、表面処理を施されたものが多かったためだと思われる。

また、丸で囲んだ部分は特に強い疲労強度を示しているが、これらは全て表面処理のひとつである「ショットブラスト」が施されたものである。この結果のみに基づけば、「ショットブラスト」が施された溶接部非仕上げの「荷重伝達型十字グルーブ溶接継手」は1等級分の安全を見込んでもB等級の強度を有すると判断できる。しかし、ブラスト処理の条件や施工状況によっては疲労強度がこのように高くない可能性もあること等を考慮すると、現時点でのデータでは結論を出すためには不十分であると考えられる。今後もデータの追加を定期的に行っていくことが重要である。

7. 結論

本研究では、膨大な疲労試験結果の管理、設計S-N線図の構築、既設構造物や今後建設される構造物の耐久性についての分析を可能とする疲労データベースの開発を試みた。また、開発したデータベースに、1990年以降に発表された疲労試験データと、それ以前の別データを追加入力した。疲労データベースはNIMSや日本材料学会等で開発されたものがあるが、以下に本データベースとの違いと成果をまとめる。

- (1) NIMS等のデータベースに収納されているデータは、各機関で実験されたデータのみが収納されている。しかし、本データベースは国内の多くの機関で実施された疲労試験のデータが収納されているのに加え、データ数も他のデータベースに引けを取らないと思われる。特に各種溶接継手に関する疲労試験データの充実、本データベースの特徴である。
- (2) 文献データや疲労試験結果を検索することのできるデータベースは見られるが、本データベースのように疲労データを検索した後、設計S-N線図と検索結果を自動でプロットし分析することまで出来るデータベースは、著者らの知る限りでは山田らが以前に開発した疲労データベースと本データベースだけである。
- (3) 著者名や論文名から文献を検索すること

ができるデータベースや、PDF の疲労データシートを提供することができるデータベースなどが公表されているが、本データベースは検索して出力されたデータより文献の出典を調べることができるなど、詳細データを求める利用者にも対応できるように工夫されている。

以上のように、利用者が行いたい主な作業を本データベース内で完結することができるようにしたこと、およびデータの充実に図ったことが本研究の成果であるといえる。また、参考にした「山田らのデータベース」との大きな違いは、文献データを本データベース内で調べることができる点である。さらに、VB で開発しているので、今後のメンテナンスや開発を継続的に行える。これらも本研究の成果であるといえる。

今後の展開として、新たなデータが追加された本データベースを活用することで、JSSC 指針等の設計 S-N 線図の見直しや、より多くの方に利用していただくため、本データベースをもとに、Web 上での検索・解析システムを開発することも可能であると考えられる。しかし現時点では、データの編集や検索を行う際に、直接データを入力しなければならないため、ラジオボタンやチェックボタンなどを配置し、検索をより簡易にすることや、データの閲覧に関

しても、表だけではなくカードフォームにも対応させ、できるだけ見やすいものにしたいと考えている。また、可能であれば文献等を PDF 化し、利用者が求める情報をすばやく提供できるデータベースに改良することも考えている。さらに、今後も文献等から疲労データの追加や既存データに関してもデータが欠落している箇所の充実に努めていく予定である。

謝辞

本研究の実施に際して、名古屋大学の山田健太郎教授にはデータベースと関連する資料を、川鉄鉄構橋梁(株)の川井豊氏、海上技術安全研究所の高橋一比古氏、川崎重工業(株)の仁瓶寛太氏、高知工科大学の穴見健吾講師、法政大学の森猛教授には疲労試験データを提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 疲れ試験データベースの作成と疲労許容応力度の評価, 昭和 62 年度科研費(一般 C) 報告書, 昭和 63 年 3 月
- 2) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針および同解説, 技報堂出版, 1993.4
- 3) http://tsuge.nims.go.jp/top/fatigue_jp.html
- 4) http://www3.jsms.jp:591/NEWBIB_index.htm